

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 25/06/2017.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DO FLUIDO DE
CORTE PELA TÉCNICA DE MQL COM SISTEMA DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE
CORTE DO REBOLO**

**Bauru
2016**

RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE PELA
TÉCNICA DE MQL COM SISTEMA DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru - SP

2016

Hildebrandt, Rodolfo Alexandre.

Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com aplicação do fluido de corte pela técnica de MQL com sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo / Rodolfo Alexandre Hildebrandt, 2016
109 f.


Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Retificação. 2. Fluido de corte. 3. Mínima Quantidade de Lubrificante - (MQL). 4. Empastamento. 5. Rebolo. 6. Aço ABNT 4340. 7. Integridade da Superfície. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 25 dias do mês de novembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, PROFESSOR DOUTOR JAIME GILBERTO DUDUCH do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS-USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT, intitulada **CONTROLE DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA COM ÊNFASE NA REDUÇÃO DO FLUÍDO DE CORTE - MQL E NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ
Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA
Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA
PROFESSOR DOUTOR JAIME GILBERTO DUDUCH

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

DE: "CONTROLE DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA
COM ÊNFASE NA REDUÇÃO DO FLUÍDO DE CORTE - MQL E NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE
CORTE DO REBOLO"

PARA:

*Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340
com aplicação do fluido de corte pela
técnica de MQL com sistema de limpeza
da superfície de corte do resoldo*

Bauru, 25 de novembro de 2016.

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Orientador

DEDICATÓRIA

À minha família com amor, carinho e gratidão, aos professores pelos fundamentos e compreensão e a todos que me apoiaram ao longo da realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por simplesmente tudo.

Aos meus familiares, em especial a meus pais Rainer Dominicus Hildebrandt e Eunice Machado Hildebrandt, pela educação e incentivo aos estudos, minha sogra Maria Rosa Rodrigues Pinheiro, meus filhos Felipe Pinheiro Hildebrandt, Fernando Pinheiro Hildebrandt e minha querida esposa Valéria Cristina R. P. Hildebrandt pelo amor, carinho, compreensão e sabedoria para suportar os momentos difíceis no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela orientação, pelos ensinamentos, disposição, intensa atenção, enorme paciência, cordialidade e grande amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP por ter-nos concedido recursos de realizar esta pesquisa.

Agradeço ao técnico de Laboratório Hamilton José de Mello pela excelente contribuição para este trabalho.

Ao companheiro de estudo e Laboratório Rafael Lemes Rodriguez pela excelente contribuição para este trabalho.

À empresa Norton pelo apoio aos consumíveis e informações relevantes para este trabalho.

Aos professores Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Dr. Ivaldo de Domenico Valarelli e Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pelo grande apoio e atenção com o início desta pesquisa.

A todos os professores que passaram em minha vida pelo conhecimento transmitido.

A todos os amigos e familiares que me apoiaram de forma direta para a realização deste trabalho.

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver caridade, sou como o bronze que soa, ou como o címbalo que retine. Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda ciência; mesmo que tivesse toda fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, não sou nada”.

(I Coríntios 13, 1-2)

RESUMO

O presente estudo aborda novas técnicas produtivas para o setor da usinagem por abrasão, destacando as tecnologias limpas e menos agressivas ao meio ambiente, tais como o emprego do fluido de corte biodegradável sem adição de água com o objetivo de reduzir a quantidade do fluido, com o emprego da técnica da mínima quantidade de lubrificação - MQL. Neste trabalho foram feitos estudos sobre a influência da lubri-refrigeração e a técnica MQL no processo de retificação, almejando a integridade da superfície sem danos microestruturais. Dessa forma, a técnica MQL pode ser comparada com ao método convencional de aplicação de fluido no processo de retificação, visando um padrão de qualidade similar. O material empregado foi o aço ABNT 4340 em forma de disco, caracterizados através dos ensaios de rugosidade, do desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da análise metalográfica, da microscopia óptica, da microdureza e da análise da influência da lubri-refrigeração nas variáveis dos sinais de potência e emissão acústica. A execução e o controle das etapas processadas durante as vazões da lubri-refrigeração através do método convencional e da técnica MQL com e sem limpeza da superfície de corte do rebolo, foram fundamentais para obter peças compatíveis com a estrutura esperada, proporcionando assim uma evolução para as etapas subsequentes do processo de retificação. Os parâmetros de vazão pela técnica MQL que mais se destacaram foram na faixa de 30 a 60 ml/h, tendo como diferencial, a inclusão da limpeza da superfície de corte do rebolo, onde melhorou substancialmente em relação ao método sem limpeza, o qual apresentou o empastamento do rebolo, inviabilizando assim este método. Os resultados dos estudos demonstram que ensaios com aplicação do MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo proporcionaram um melhor desempenho em relação ao método MQL sem limpeza, ou seja, o método com limpeza foi a condição em que mais se aproximou ao método convencional na maioria das variáveis analisadas. No entanto, as diferenças de valores obtidos não apresentaram divergência dimensional e estrutural, onde os resultados mostraram um ótimo desempenho e condições de conformidade para o processo, viabilizando sua implantação aos processos existentes, podendo também ser inclusos na concepção de novas máquinas.

Palavras chaves: Retificação, Fluido de Corte, Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), Empastamento, Rebolo, Aço ABNT 4340, Integridade da Superfície.

ABSTRACT

The present study addresses new production techniques for the abrasion machining sector, highlighting the clean and less aggressive technologies to the environment, such as the use of biodegradable cutting fluid without addition of water in order to reduce the amount of fluid with the Minimal Quantity Lubrication (MQL). In this work, studies were done on the influence of the flood coolant and the MQL technique in the grinding process, aiming the integrity of the surface without microstructural damages. Thus, the MQL technique can be compared to the conventional fluid application method in the grinding process, aiming at a similar quality standard. The material used was disc-shaped ABNT 4340 steel, characterized by roughness tests, circularity deviation, diametrical grinding wheel wear, metallographic analysis, optical microscopy, microhardness and analysis of the influence of the flood coolant in the variables of the power and acoustic emission signals. The execution and control of the steps processed during the flood coolant flow through the conventional method and the MQL technique with and without cleaning of the grinding surface of the grinding wheel were fundamental to obtain parts compatible with the expected structure, thus providing an evolution to the subsequent steps of the grinding process. The flow parameters of the MQL technique that stood out most were in the range of 30 to 60 ml / h, having as a differential the inclusion of the cleaning of the cutting surface of the grinding wheel, where it improved substantially in relation to the method without cleaning, which presented the of the wheel clogging, thus making this method unfeasible. The results of the studies show that MQL applications with clean cutting surface of the grinding wheel provided a better performance in relation to the MQL method without cleaning, this way, the cleaning method was the condition that most approached the conventional method in most variables analyzed. However, the differences in values obtained did not show dimensional and structural divergence, where the results showed an excellent performance and compliance conditions for the process, making possible its implementation to the existing processes, and could also be included in the design of new machines.

Keywords: Grinding, Cutting Fluid, Minimal Quantity Lubrication (MQL), Wheel clogging, Grinding Wheel, Steel ABNT 4340, Surface Integrity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).....	25
Figura 2.2. Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de CHEN <i>et al.</i> 2002).....	26
Figura 2.3. Relação entre energia específica de retificação e acabamento da superfície (Adaptado de MARINESCU <i>et al.</i> 2007).....	28
Figura 2.4. Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002).....	29
Figura 2.5. Formação de cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de MALKIN, 1989).....	30
Figura 2.6. Grandezas físicas de retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).....	31
Figura 2.7. Principais constituintes do rebolo (WEBSTER & TRICARD, 2004).	37
Figura 2.8. Função do fluido de corte (Adaptado de ROWE, 2014).....	42
Figura 2.9. Classificação dos fluidos solúveis em água (Adaptado de EL BARADIE, 1996).	46
Figura 2.10. Distribuição dos custos da lubri-refrigeração no processo de usinagem na indústria automotiva (Adaptado de SANCHEZ <i>et al.</i> 2010).....	49
Figura 2.11. Processos de fabricação poluindo o meio ambiente (Adaptado de SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).....	52
Figura 2.12. Ilustração esquemática do princípio de funcionamento para o bocal de saída dupla (Adaptado de YIN <i>et al.</i> , 2015).	54
Figura 2.13. Ilustração a) “borra” no rebolo composta entre óleo e cavaco, b) ampliação da área do rebolo em (a).....	56
Figura 2.14. Ilustração das posições dos bocais MQL e sistema de retificação com ar comprimido na limpeza do rebolo (Adaptado de OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012).....	57
Figura 2.15. Representação esquemática do campo de tolerância de circularidade.....	59
Figura 2.16. Peça com desvio de circularidade (Adaptado de TAYLOR-HOBSON, 2001). ..	60
Figura 2.17. Fontes de emissão acústica na retificação (KARPUSCHEWISKI, 2001).....	62
Figura 3.1. Configuração dos Equipamentos – Aquisição de dados	66
Figura 3.2. Desenho técnico, fora de escala, do corpo de prova de Aço ABNT 4340 utilizado na pesquisa.....	67

Figura 3.3. Unidade de controle do aplicador de fluido pela técnica MQL. Fabricante ITW Chemical Products Ltda., modelo ITW Accu-lube 79053D.	68
Figura 3.4. Desenho técnico em corte do bocal utilizado na técnica de aplicação do MQL....	69
Figura 3.5. Sistema de ar comprimido para o MQL.....	69
Figura 3.6. Bocal de Limpeza – a) Posicionador, b) Desenho técnico.....	70
Figura 3.7. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza	71
Figura 3.8. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30°.....	71
Figura 3.9. Matriz dos ensaios realizados.....	73
Figura 3.10. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.....	74
Figura 3.11. Equipamento de medir circularidade marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C®	75
Figura 3.12 Método para avaliação de desgaste do rebolo: a) operação de impressão do rebolo na peça. b) peça após a impressão.	76
Figura 3.13 Esquema ilustrativo do processo: a) impressão do perfil do rebolo na peça. b) representação da área desgastada no rebolo.....	76
Figura 3.14. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo através da altura dos degraus do corpo de prova.	77
Figura 3.15. Representação do corte da amostra do corpo de prova e retirada de material para as análises de Metalografia e determinação de Microdureza.	77
Figura 3.16. Amostra após o embutimento do corpo de prova em resina baquelite	78
Figura 3.17 Lixadeira manual.....	78
Figura 3.18. Politriz Metalográfica marca STRUERS®	79
Figura 3.19. Microscópio Óptico utilizado na captação das imagens metalográficas.....	80
Figura 3.20. Representação do Microdurômetro utilizado na etapa de indentação.....	80
Figura 3.21. Esquema para medição da microdureza conforme ASTM E384: a) desenho representando a operação, b) imagem captada através da lupa do equipamento de medição de microdureza.	81
Figura 3.22. Potência versus tensão do módulo	83
Figura 4.1. Rugosidade (Ra) do aço ABNT 4340 após retificação cilíndrica em várias condições de vazão (Q).....	86

Figura 4.2. Superfície de rugosidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.	87
Figura 4.3. Desvio de circularidade em função das condições de vazão.....	88
Figura 4.4. Desvio de circularidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.	89
Figura 4.5. Desgaste do rebolo de alumina versus a técnica de aplicação de fluido de corte. .	91
Figura 4.6. (a) Ensaio com a vazão (Q) 30 ml/h (S/L) (b) Topografia da superfície de corte do rebolo.	91
Figura 4.7. Análise estatística do desgaste do rebolo para as diversas condições de lubri-refrigeração.....	92
Figura 4.8. Potência consumida em função da condição de lubri-refrigeração utilizada.....	93
Figura 4.9. Emissão acústica em função da condição de lubri-refrigeração empregada na retificação do aço ABNT 4340.....	95
Figura 4.10. Micrografia do aço ABNT 4340 após retificação com as técnicas: a) Convencional, b) MQL 30 ml/h - C/L, c) MQL 30 ml/h - S/L, d) MQL 60 ml/h - C/L, e) MQL 60 ml/h - S/L, f) MQL 120 ml/h - C/L, g) MQL 120 ml/h - S/L. Ampliação de 500 X.	96
Figura 4.11. Microdureza do aço ABNT 4340 abaixo da superfície usinada após várias condições de lubri-refrigeração.	98
Figura 4.12. Resultados de microdureza após várias condições de lubri-refrigeração.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição típica dos fluidos a base de água.....	43
Tabela 2.2. Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias..	44
Tabela 2.3. Principais tipos de fluidos de corte e suas principais propriedades e composições	45
Tabela 2.4. Identificação do óleo de corte como resíduo perigoso anexo 1 – B resíduos perigosos - classe I de fontes não específicas (Anexo A da NBR-10.004/87).....	51
Tabela 2.5. Composição química do aço ABNT 4340	64
Tabela 3.1. Condições e parâmetros utilizados em todos os ensaios de retificação.....	72
Tabela 3.2. Valores obtidos para calibração.....	82
Tabela 3.3. Configurações do módulo de EA.....	84
Tabela 4.1. Relação da potência consumida em relação ao sistema de lubri-refrigeração convencional.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – profundidade de retificação

a_d – profundidade de dressagem

ANOVA – análise de variância

a_p – profundidade de corte

b – largura de retificação

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

d_e – diâmetro equivalente

d_s – diâmetro da ferramenta de corte - rebolo

d_w – diâmetro da peça de trabalho

DPO – Parâmetro definido pela multiplicação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência elétrica máxima por passada do rebolo (ciclo)

EPI – equipamento de proteção individual

h_{eq} – espessura equivalente de corte

h_{max} – espessura teórica máxima do cavaco

F_n – força normal de corte

F_t – força tangencial de corte

G – relação G

H – dureza

HRC – dureza Rockwell

HV – dureza Vickers

l_c – arco ou comprimento de contato

MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante

n_s – velocidade ou rotação do rebolo

n_w – velocidade ou rotação da peça

P – carga aplicada / potência de retificação

PAIR – perda auditiva induzida pelo ruído

P_w – potência consumida

q_s – relação de velocidade rebolo e peça

Q_w – taxa de remoção volumétrica

Q'_w – taxa específica de remoção volumétrica

R_a – rugosidade média

RMS – valor médio quadrático (*root mean square*)

t – tempo de retificação

t_s – tempo de centelhamento (*spark-out*)

U_c – energia específica

V – tensão elétrica

V_f – velocidade de avanço da ferramenta de corte ou mergulho

V_s – velocidade tangencial da ferramenta de corte

V_w – velocidade tangencial da peça de trabalho

Z_s – volume de rebolo gasto

Z_w – volume de material removido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Motivação para a realização deste trabalho.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. Processo de retificação.....	24
2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho.....	25
2.2.1. Força tangencial de corte.....	26
2.2.2. Potência de retificação.....	27
2.2.3. Energia Específica (u_c).....	27
2.2.4. Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho.....	28
2.2.5. Mecanismos de formação do cavaco na retificação.....	30
2.3. Parâmetros do processo de retificação.....	31
2.3.1. Profundidade de Corte (a).....	32
2.3.2. Comprimento de contato (l_c).....	33
2.3.3. Diâmetro equivalente (d_e).....	33
2.3.4. Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	34
2.3.5. Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s).....	34
2.3.6. Velocidade da peça (V_w).....	35
2.3.7. Velocidade de mergulho (V_f).....	36
2.3.8. Taxa de Remoção de Material (Q_w).....	36
2.4. Rebolo.....	37
2.4.1. Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3).....	38
2.5. Dressagem.....	40
2.6. Fluido de corte.....	41

2.6.1. Tipos de Fluidos de Corte.....	43
2.6.1.1.Fluidos solúveis em água.....	44
2.6.1.2.Óleos emulsificáveis ou emulsões.....	46
2.6.1.3.Fluidos químicos ou sintéticos	47
2.6.1.4.Fluidos semi-sintéticos	48
2.6.2. Custos dos fluidos de corte no processo.....	48
2.6.3. Manuseio, manutenção e descarte do fluido de corte.....	49
2.6.3.1.Problemas devido à aplicação dos fluidos de corte	50
2.7. Usinagem a seco	53
2.8. Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).....	54
2.8.1. Limpeza da superfície de corte do rebolo.....	56
2.9. Caracterização do Processo de Retificação	58
2.9.1. Rugosidade	58
2.9.2. Circularidade	58
2.9.2.1.Desvio de Circularidade	60
2.9.3. Desgaste diametral do rebolo – Relação G.....	60
2.9.4. Emissão Acústica – EA	61
2.9.5. Análise da microestrutura – Microscopia Óptica	63
2.9.6. Microdureza.....	63
2.10. Características do Aço ABNT 4340	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1. Equipamentos e materiais utilizados.	65
3.1.1 Equipamentos para Monitoramento e Análise.....	66
3.1.2 Corpo de Prova.....	67

3.1.3	Rebolo.....	67
3.1.4	Sistema de refrigeração convencional	67
3.1.5	Sistema de lubri-refrigeração - mínima quantidade de lubrificação – MQL.....	68
3.1.6	Sistema de limpeza	70
3.2.	Parâmetros e condições para os ensaios	71
3.3.	Caracterização do corpo de prova após o processo de retificação	73
3.3.1.	Medição da Rugosidade.....	74
3.3.2.	Medição da Circularidade.....	74
3.3.3.	Determinação do desgaste do rebolo.....	75
3.3.4.	Análise metalográfica	77
3.3.4.1.	Microscopia óptica	79
3.3.5.	Avaliação da Microdureza.....	80
3.3.6.	Análise de potência de retificação e emissão acústica	81
3.3.6.1.	Análise de potência.....	82
3.3.6.2.	Análise da emissão acústica	83
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1.	Rugosidade	85
4.2.	Circularidade	88
4.3.	Desgaste do rebolo	90
4.4.	Valores de Potência Consumida.....	93
4.5.	Emissão acústica.....	95
4.6.	Microscopia óptica	96
4.7.	Microdureza.....	97
5.	CONCLUSÕES	100

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação merece destaque entre os processos abrasivos pela sua importância para a indústria metal-mecânica. Na prática, esse processo se enquadra como abrasão, por constituir como ferramenta principal o rebolo, em que os grãos abrasivos são responsáveis pela retirada de material da peça usinada, caracterizando como a etapa final do processo de fabricação, garantindo valores de rugosidade menores (0,1 a 1,6 μm), como também tolerâncias mais estreitas definidas pelas qualidades de trabalho (IT3 a IT6).

Embora muito empregada, a retificação é um dos processos de usinagem com maior grau de complexidade, devido à grande quantidade de variáveis presentes com um grande número de parâmetros, que em combinação, determinam o acabamento e integridade das peças desejadas.

Atualmente, diversas retificadoras utilizam o sistema convencional de aplicação de fluido de corte consideradas como técnicas de consumo de elevada vazão (250 a 700 l / h) que, conseqüentemente, influenciará no consumo de água e fluido. Sokovic e Mijanovic (2001) relatam que a importância da substituição de processos e métodos tradicionais de lubrificação se faz necessário para gerar condições de fabricação que estejam tecnologicamente e economicamente associadas às reduções do impacto ao meio ambiente. Para o sistema de mínima quantidade de lubrificação - MQL, também chamado como “*Dry-near machining*”, o consumo de fluido de corte é controlado, sendo aplicado através da injeção de uma mistura de ar e óleo a altas pressões em direção à superfície de usinagem (PUSAVEC *et al.*, 2014) e vazão (10 a 240 ml / h). O emprego da técnica MQL resulta em redução drástica da vazão de seu volume, onde o consumo de água é reduzido, representando assim um dos pontos de grande contribuição para o desenvolvimento de pesquisa em usinagem.

Attanasio *et al.* (2006) descrevem que no MQL, primeiramente, é preciso fazer a mistura do ar com o óleo, para depois ser expelido. Existem duas formas de mistura: uma ocorre fora do bocal e outra dentro do mesmo.

Por sua vez, esse fluido é responsável pela transferência de calor com o resfriamento do material, sendo ele responsável também pela retirada do cavaco e das impurezas que se encontram na peça ou na ferramenta, reduzindo o atrito e minimizando o desgaste do rebolo por funcionar como lubrificante.

Assim como a consciência ambiental é exigida e solicitada por meio de ações eficazes, a fim de reduzir os impactos ao ambiente de trabalho e no meio ambiente global, associada às reduções de custos relacionados com fluidos de corte, surgiram alternativas de lubri-refrigeração, entre elas, a mínima aliada aos aspectos econômicos quantidade de lubrificante (MQL), já que a retificação a seco não tem sido apropriada para processos de retificação com rebolos convencionais, devido à geração excessiva de calor (WEINERT *et al.*, 2004).

Segundo Sadeghi *et al.* (2009), a preocupação ambiental se tornou incrivelmente importante para os processos produtivos, e tecnológicos. A crescente busca por técnicas que respeitem o meio ambiente e que reduzam os custos com descarte de fluido tem dado lugar às formas alternativas. Entre elas está o MQL e a usinagem a seco.

Assim, atendendo a determinação das políticas de educação ambiental, conforme lei 9.795 de 27/04/1999 e Decreto nº 4.281 de 25/06/2002, a divulgação nas áreas de ensino e pesquisa, o artigo 8º descreve que as atividades vinculadas à política nacional de educação ambiental devem ser desenvolvidas na educação em geral e na educação escolar, por meio das linhas de atuação inter-relacionadas, conforme inciso 3º, as ações de estudos, pesquisas e experimentações voltar-se-ão para a difusão de conhecimentos, tecnologias e informações sobre a questão ambiental como descrito no item II.

1.1. Motivação para a realização deste trabalho

A melhoria contínua dos processos de fabricação, em especial a usinagem por abrasão, motiva a utilização de novas tecnologias alinhadas à constante redução de custo e adequadas às novas tendências de mercado. O estudo da refrigeração convencional versus a implantação da técnica da mínima quantidade de fluído, vem motivando o desenvolvimento de novas pesquisas com resultados positivos para que se tenha um processo de fabricação mais limpo, com a redução de resíduos e o atendimento pleno às legislações ambientais.

É fundamental aproveitar as potencialidades desta técnica que ainda não foram exploradas, para se produzir peças com a mesma qualidade obtida com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de retificação.

Nesse sentido, a importância deste estudo está na comparação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) sem e com sistema de limpeza na superfície de corte do rebolo. Ensaios serão realizados com a técnica convencional abundante de fluido de corte,

onde o aperfeiçoamento da lubri-refrigeração poderá reduzir a alta geração de resíduos que se dá no atual processo convencional. Dessa forma, buscar uma nova alternativa de lubri-refrigeração no processo de retificação a partir de dados concretos obtidos experimentalmente, apontando meios práticos para que possam ser aplicada nas indústrias, propondo uma melhoria no processo de retificação externa de mergulho do aço ABNT 4340 com a aplicação da técnica de MQL, tornando-a uma alternativa interessante e exequível em relação à técnica convencional de lubri-refrigeração.

Não foi encontrado na literatura específica, nenhum trabalho científico que apresente a proposta de retificação de mergulho do aço ABNT 4340 com a utilização da técnica de MQL com sistema de limpeza de rebolos abrasivos convencionais. Levando em consideração o fenômeno do empastamento do rebolo (TAWAKOLI *et al.*, 2010), o método de limpeza é um dos grandes desafios e objetivos na operação de retificação a serem investigados nesta pesquisa.

A análise do desempenho da técnica aplicação MQL com limpeza será em junção dos parâmetros da rugosidade, do desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da análise metalográfica em conjunto com a microscopia óptica e a microdureza.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos de retificação do aço ABNT 4340 sob a aplicação das sete diferentes condições de lubri-refrigeração, com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco, pode-se concluir que:

As condições testadas utilizando o método MQL com a limpeza do rebolo e as três vazões estabelecidas para este trabalho, mostraram-se mais eficientes que o sistema de lubri-refrigeração sem a limpeza do rebolo, ou seja, apresentaram em geral melhores condições de retificação, qualidade das peças superior em relação ao seu dimensional e apresentou menor consumo da ferramenta de corte.

Ainda para a condição de MQL sem a limpeza do rebolo, os resultados dos testes influenciaram significativamente nos valores de rugosidade, circularidade e no desgaste do rebolo durante o processo de retificação.

No geral, a média dos resultados para as etapas de rugosidade e desvio de circularidade para as condições com métodos de lubri-refrigeração convencional e MQL com a limpeza do rebolo, mantiveram-se abaixo da tolerância máxima consentida para fabricação do corpo de prova estipulado neste projeto (modelo de um eixo). Para o processo de retificação cilíndrica externa, as tolerâncias estão fundamentadas nas normas citadas neste trabalho.

As análises de microdureza demonstraram resultados significativos para todas as condições de lubri-refrigeração testadas, onde todas as condições de retificação mantiveram os valores de dureza abaixo do valor nominal especificado 715 HV, não apresentando danos térmicos à superfície das peças retificadas, mantendo sua estrutura dentro dos parâmetros especificados para os aços endurecidos retificados, sendo satisfatório para o este processo de retificação.

Assim a técnica MQL com limpeza se destacou como uma condição a ser implantada e muito significativa para o processo de retificação, pois demonstrou que as propriedades que serão solicitadas as peças de trabalho estão muito similares à técnica convencional em todas as análises realizadas.

Portanto esses resultados poderão servir como referência para a implementação de uma nova metodologia de trabalho na retificação atual e na concepção de novas máquinas/equipamentos a serem fabricadas, demonstrando uma tecnologia que irá contribuir com o meio ambiente na redução de resíduos e dos custos aplicado ao processo de retificação.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Análise de custos da implantação do sistema MQL - (fluido puro e com adição de água), com e sem limpeza na zona de corte do rebolo (medir o ganho econômico com a utilização da técnica de lubri-refrigeração por MQL).
- 2- Realizar o estudo verificando a tensão residual por difração de Raio X.
- 3- Implantar o sistema MQL em uma linha de produção com atuação em afiação e manutenção de ferramentas de cortes industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. (1997). **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 5a. ed. Edgard Blucher Ltda.

ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. (2009). **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40p. 2003-2030.

ALVES, M.C.S. (2005). **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Tese de Mestrado em Engenharia Industrial – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. (2008). **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding**. Journal of materials processing technology, 204, p. 269-278.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6158: **Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6405: **Rugosidade das Superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8404: **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 2768-2: **Tolerâncias gerais. Parte 2: Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual**. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM E140-07. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM E384-11. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. (2006). **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear**. Wear 260 (2006) 333-338.

AURICH J.C.; B. LINKE, B; HAUSCHILD, M.; CARRELLA. M; KIRSCH, B. (2013). **Sustainability of abrasive processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 – 653-672.

AYUBI, M.A., MOHAMED, A.B., ESA, A.H. (2014). **In-line inspection of roundness using machine vision**. Procedia Technology 15: 808-817.

BABEL, R; KOSHY, P; WEISS, M. (2013). **Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 64, p. 96-101.

BALDO, Édimo Dudas. (1994). **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica**. 1994, 86 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

BARCZAK, L.M; BATAKO, A.D.L; MORGAN, M.N. (2010). **A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 50, p. 977-985.

BATALLER, H et al. (2004). **Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture**. J. Mater. Process. Tehnol, 152: 215-220p.

BIANCHI, E. C.; DIAS, A. C. P.; BORTOLOTO, R. G.; JÚNIOR, C. E. S.; SANCHEZ, L. E. A.; JÚNIOR, M. V. (1996). **A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem**. Revista Máquinas e Metais, nº 364, p. 70-83.

BIGERELLE, M.;HAGEGE, B.;EL MANSORI,M. (2008). **Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding**. Tribology Internacional, Vol. 41, p. 992-1001.

CAMERON, A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. (2010). **An investigation of the effects of wheelcleaning parameters in creep-feed grinding**. Int J Mach Tools Manuf 50:126-130. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008.

CHEN, M. C. (2002). **Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions**. Computers in Industry, Vol. 47, p. 185-197.

CHEN, X., ROWE, W.B. (1990). **Analysis and simulation of the grinding process, Part I: Generation of the grinding wheel surface**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 36, No. 8, pp. 871-882.

CHEN, X.; ROWE, W. B.; CAI, R. (2002). **“Precision grinding using CBN wheels”**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, p.584-593.

COLPAERT, H. (2008). **“Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”**. 4. ed. São Paulo : Ed. Edgard Blucher Ltda.

CONAMA. RESOLUÇÃO nº 23, de 12 de dezembro de 1996. Publicada no DOU nº 13, de 20 de janeiro de 1997, Seção 1, pág. 1116-1124.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL, Art. 225 (1988).

DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; MANSORI, N. E. (2008). **On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms**. Springer Science-Business Media, LLC.

DING, K., FU, Y., SU, H., GONG, X., WU, KEQIN. (2014). **Wear of Diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicone carbide**. International Journal of Manufacturing Technology, 71:1929-1938.

DINIZ, A. E.; LIU, J. J.; DORNFELD, D. A. (1992). **Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning**. Wear, v. 152, n. 2, p. 395-407.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (2008). **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição.

EL BARADIE, M. A. (1996). **Cutting Fluids: Part II – Recycling and Clean Machining**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 56, No. 1-4, pg. 798-806.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. 2016. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-4340>>. Acesso em 18 out. 2016.

FERRARI, C. (2015). **Análise comparativa dos métodos MQL, MQL/ÁGUA e convencional na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio**. Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru.

GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. (2004). Schweiz: Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, 87 p.

GUO, C.; MALKIN, S. (2000). **Energy Partition and Cooling During Grinding**. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 2/No. 3.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. (2003). **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, nº 8, p. 755-761.

HEINZEL. C.; BLEIL, N. (2007). **The Use of the Size Effect in Grinding for Work-hardening**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 56, p. 327-330.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. (1998). **The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process**. Machines and Metals Magazine, nº 386, p. 22-38.

ICERI, D.M., SOUSA, R.M., DESTRO, R.S., OIKAWA, M.H., BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R., FORTULAN, C.A. (2012). **Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas**. Cerâmica, 58: 84-89.

IRANI, R. A.; BAUER R. J.; WARKENTIN, A. (2005). **A review of cutting fluid application in the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, nº 45, p. 1696-1705.

JACKSON, M.J.; DAVIS, C.J.; HITCHINER, M.P.; MILLS, B. (2001). **High-speed grinding with CBN grinding wheels applications and future technology**. Journal of Materials Processing Technology, 110, p. 78-88.

JACKSON, M.J.; KHANGAR, A.; CHENC, X.; ROBINSON, G.M.; VENKATESH, V.C.; DAHOTRE N.B. (2007). **Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels**. Journal of Materials Processing Technology, 185, p.17-23.

JIANG, J.L.; GE, P.Q.; BI, W. B.; ZHANG, L; WANG, D. X.; ZHANG, Y. (2013). **2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process**, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 74: 29-40.

KARPUSCHEWISKI, B. (2001). **Sensor for physical properties**. In: TÖNSHOFF. H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* vol.1. Wiley-VCH. Cap. 3. p. 123-142.

KING, R. I.; HAHN, R. S. (1992). **Handbook of modern technology**.3a Ed.

KRUEGER, M.K.; YOON, S.C.; GONG, D. (2000). **New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvement in Grinding Performance**. Presented at the Coolants/Lubricants for Metal Cutting and Grinding Conference.

KUMAR, S.; YADAV, M.; AGRAWAL, P.; KHAN, M. Z.; VASHISTA, M. (2011). **Assesment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis Parameters**. *ISRN Materials Science*, vol. 2011, Article ID 525078, 5 pages.

LEE, S.W.; LEE, Y.C.; JEOND, H.D.; CHOI, H.Z. (2002). **The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding**. Journal of Materials Processing Technology, 128, p.67-72.

LI, Z.C, LIN, B., XU, Y.S., HU, J. (2002). **Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state technique**. Journal of Material Processing Technology (129) 76-80.

LIAO, T.W.; ZHANG, Z.M.; MOUNT C.R. (2000). **A case based reasoning system for identifying failure mechanisms**. Engineering Applications of Artificial Intelligence.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. (2011). **Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids**. Machining Congress, São Paulo.

MALKIN, S. (1989). **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**. In: MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited.

MALKIN, S. (2008). **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**, In: MALKIN, S. **Grinding Technology: Theory and Aplications of Machining with Abrasives**, 2^a ed. Chichester: Ellis Horwood Limited.

MALKIN, S.; GUO, C. (2007). **Thermal Analysis of Grinding** - CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.56, p. 760-782.

MALKIN, S., GUO. C. (2008). **Grinding technology: theory and aplications of machining with abrasives**. New York: Industrial Press, p. 372.

MAO, C.; ZHOU, X.; YIN, L.; ZHANG, M; TANG, K.; ZHANG, J. (2015). **Investigation of the flow field for a double-outlet nozzle during minimum quantity lubrication grinding.** Int J Adv Manuf Technol. DOI 10.1007/s00170-015-7896-2.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. (2013). **Tribology of abrasive machining processes.** 2ªed. Norwich, William Andrew Inc.

MARINESCU, I. D. et al. (2007). **Handbook of Machining with Grinding Wheels.** 1a Ed. ed. [S.l.]: CRC Press.

MARINESCU, I.; TONSHOFF, H.K.; INASAKI, I. (2007). **Deformation and fracture of ceramics materials.** In: Handbook of Ceramic Grinding and Polishing, New Jersey: William Andrew Publishing/Noyes, cap. 2.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; INASAKI, I. (2006). **Handbook of machining with grinding wheels.** CRC.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. (2004). **Tribology of abrasive machining processes,** 1ª ed. Norwich: William Andrew Publishing, 751 p.

MARTINS, Cesar H. R. et al. (2014). **Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models.** Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement. Piscataway: Ieee-inst Electrical Electronics Engineers Inc, v. 63, n. 3, p. 667-679.

NASCIMENTO, W.R. (2014). **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica de cerâmica avançada com rebolo de ligante resino cerâmico/metálico.** Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

NAKAI, M. E., Aguiar, P. R., Junior, H. G., Bianchi, E. C., Spatti, D. H., & D'Addona, D. M. (2015). **Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics.** Expert Systems with Applications, 42(20), 7026-7035. doi:10.1016/j.eswa.2015.05.008

NGUYEN, T.A.; BUTLER, D.L. (2005). **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, p. 1321-1328.

NOVASKI, O.; RIOS, M. (2004). **Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga.** Revista Máquinas e Metais, v. 460, p. 214-223,

NOVASKI, O.; RIOS, M. (2002). **Vantagens do uso de fluidos sintéticos na usinagem.** Revista Metal Mecânica, nº 118 : 56-62.

OLIVEIRA, D.J; GUERMANDI, L.G; BIANCHI, E.C; DINIZ, A.E; AGUIAR, P.R; CANARIM, R.C. (2012). **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning.** Journal of Materials Processing Technology. v.212, p.2559-2568.

OLIVEIRA, J. F. G.; BIANCHI, E. C.; SOUZA, G. F. (1992). **O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem**. Revista Máquinas e Metais, v. 317, p. 12-28.

PATNAIK Durgumahanti US, Singh V, Venkateswara Rao P. (2010). **A new model for grinding force prediction and analysis**. Int J Mach Tools Manuf 5: 231-240.

Políticas de Educação Ambiental conforme a Lei 9.795 de 27/04/1999 e Decreto nº 4.281 de 25/06/2002.

PUERTO, P., FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. (2013). **Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear**. Procedia Engineering, 63: 174-182.

PUSAVEC, F.; DESHPANDE, A.; YANG, S.; M'SAOUBI, R.; KOPAC, J.; DILLON, O. W. (Jr.); JAWAHIR, I. S. (2014). **“Sustainable machining of high temperature Nickel alloy e Inconel 718: part 1 e predictive performance models”**. Journal of Cleaner Production 81, p.257.

RAMESH, K.; HUANG, H. (2003). **The Effects of Grinding Wheel Speed on Burr Creation and Surface Quality**. Machining Technology Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore.

RASIM, M., MATTFELD, P., KLOCKE, F. (2015). **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning**. Journal of Materials Processing Technology 226, p. 60-68.

REN, Y.H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z.X. (2009). **Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.58, p. 299-302.

ROWE W. B. (2014). **Principles of Modern Grinding Technology**. Elsevier, Second Edition.

ROWE, W. B. (2009). **Principles of Modern Grinding Technology**. New York: William Andrew Inc, 300 p.

ROWE, W. B.; MORGAN, M. N. (1993). **The effect of deformation on the contact area in grinding**. Annals of the CIRP, vol. 42/1.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. (1990). **“Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle Triboconcept”**, Edições Técnicas, p. 71-171.

SALEH, T., BISHWAS, I., RAHMAN, M. (2009). **Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feed back**. International Journal of Machine Tools & Manufacture.

SALMON, S. C. (1992). **“Modern Grinding Process Technology”**. MacGraw-Hill.

SANCHEZ, J.A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZTOLEDANO, J. (2010). **Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology**. Journal of Cleaner Production 18, p. 1840-1849.

SHARMA, V.S.; SINGH G.; SØRBY, K. (2014). **A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes**. Mater Manuf Process 30: 935-953. doi: 10.1080/10426914.2014.994759.

SHAW, M.C. (1996). **Energy Conversion in Cutting and Grinding**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.45, p. 101-104.

SILVA LR, CORRÊA ECS, BRANDÃO JR, DE ÁVILA RF. (2013). **Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process**. Journal of Cleaner Production.

SILVA NETO, J.F. (2012). **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

SILVA, L.R.; BIANCHI, E.C.; FUSSE, R.Y.; CATAI, R.E.; FRANC, T.V.; AGUIAR, P.R. (2007). **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 412-418.

SOARES, D. D. e OLIVEIRA, J. F. G. (2002). **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais**. Revista Máquina & Metais, nº 436, p.140-157.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. (2001). **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes**. Journal of Materials Processing Technology, v. 109, nº 1-2, p. 181-189.

STANFORD, M.; Lister, P.M. (2002). **The future role of metalworking fluids in metal cutting operations**. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 54 Iss: 1, pg.11-19.

SUN, L., Yang, S., Yang, L., Zhao, P., Wu, P., & Jiang, Z. (2015). **A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials**. Procedia CIRP, 27, 192-197. doi:10.1016/j.procir.2015.04.065.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M.H. (2010). **Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant–lubricant types**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 50, nº 8, p. 698-708.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H.; DANESHI, A.; STOCKERT, S.; RASIFARD, A. (2009). **An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 49, p. 924-932.

TÖNSHOFF, H.K.; LIERSE, T.; INASAKI, I. (1999). **“Grinding of advanced ceramics”**. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. Machining of Ceramics and Composites, Marcel Dekker, cap.3.

UMEDA, Y.; TAKATA, S.; KIMURA; TOMYAMA, T.; SUTHERLAND, J.; KARA, S.; HERRMANN, C.; DUFLOU, J.R. (2012). **Toward Integrated Product and Process Life Cycle Planning – an Environmental Perspective**. STCA, P.681.

WEBSTER, J.; CUI, C.; MINDEK JR., R. B. (1995). **Grinding Fluid Application System Design**. Annals of the CIRP, v. 44, n° 1, p. 333-338.

WEBSTER, J; TRICARD, M. (2004). **Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. v.53, p. 597-617.

WECK, M.; HENNES, N.; SCHULZ, A. (2001). **Dynamic Behavior of Cylindrical Traverse Grinding Processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. V.50, p. 213-216.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WACABAYASHI, T. (2004). **Dry machining and minimum quantity lubrication**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 53, p. 511-537.

WINTER, M., HERRMANN, C. (2014). **Eco-Efficiency of Alternative and Conventional Cutting Fluids in External Cylindrical Grinding**. Procedia CIPR 15, p. 68-73.

ZHANG, Y.B., LI, C.H., JIA, D., ZHANG, D.K., ZHANG, X.W. (2015). **Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil**. Journal of Cleaner Production, Volume 87, p. 930–940.

ZHANG, XH; YAN, C; CHEN, GY; AN, WK; DENG, ZH. (2014). **Experimental investigations of microcracks in laser induced cracking turning alumina ceramic**. Mater Manuf Process 29 (10): 1277-1283.